

绕流管法流量测量在卧式轴流泵中的应用

孙 勇¹, 严登丰², 薛海朋¹, 朱 慧¹

(1. 江苏省秦淮河工程管理处, 江苏 南京 221022; 2. 扬州大学, 江苏 扬州 225000)

摘要:论述提水灌溉的泵站监测特别是流量监测的必要性、重要性,列举秦淮新河泵站监测相关规程、规范和条例的规定,分析适用泵站监测的流量测量方法。介绍适用泵站测流的绕流管差压式流速流量计,该流量计具有突出优点,流速流量系数可准确标定,并不随雷诺数大小及使用年限而变化,取压管可方便地“插入”被测管道(或水泵吸水室),安装、维修方便,是包括南水北调等无直管段条件的低扬程大泵站及其它各类泵站简单、可信、准确度高的理想现场测流设备。

关键词:泵站; 监测; 流速流量计; 绕流管流量计

中图分类号:TV675

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)09-0031-06

Application of flow measurement with circumferential flow pipe method in horizontal shaft axial pump

SUN Yong¹, YAN Dengfeng², XUE Haipeng¹, ZHU Hui¹

(1. Management Division of Qinhuai River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210022, Jiangsu;
2. Yangzhou University, Yangzhou 225000, Jiangsu)

Abstract: The necessity and importance of pumping station monitoring, especially flow monitoring for irrigation were discussed. The regulations, codes and regulations of the new Qinhuai River Pumping Station were listed, and the flow measurement methods for pumping station monitoring were analyzed. The circumferential flow pipe differential pressure flow velocity of the applicable pump station were introduced, which had outstanding advantages. The flow velocity coefficient could be accurately calibrated, which was not changing with the Reynolds number size and the service life. The suction pipe could be conveniently inserted into the pipe (or water pump suction chamber), convenient for installation and maintenance, which was an ideal field measurement equipment with low lift pump station and other kinds of pump stations with the characteristics of simple, reliable and high accuracy.

Key words: pumping station; monitoring; flow meter; circumferential flow pipe flow meter

1 工程概况

秦淮新河泵站工程位于南京市雨花台区天后社区秦淮新河入江口处,与秦淮新河节制闸、鱼道、船闸和堤防共同构成秦淮新河水利枢纽,是秦淮河流域的主要控制建筑物之一。秦淮新河泵站于1982年6月建成,工程投入运行多年来为流域的防洪、排涝、灌溉、航运等发挥了重要的作用。尤其对

流域内的省会南京、禄口国际机场、宁芜铁路、沪宁高速公路(铁路)和重要城镇、厂矿及圩区的防洪、排涝、灌溉具有特别重要的意义。工程流域位置图见图1。

秦淮新河泵站安装1700ZWSQ10-2.5型双向卧式轴流泵、Y500-6/630 kW异步电机、B2SH11齿轮箱5台套,设计扬程:灌溉2.5 m、排涝2.0 m,设计流量 $50 \text{ m}^3/\text{s}$,总装机容量3150 kW。该站为双

收稿日期:2019-04-12

作者简介:孙勇(1973—),男,本科,高级工程师,主要从事水利工程管理工作。

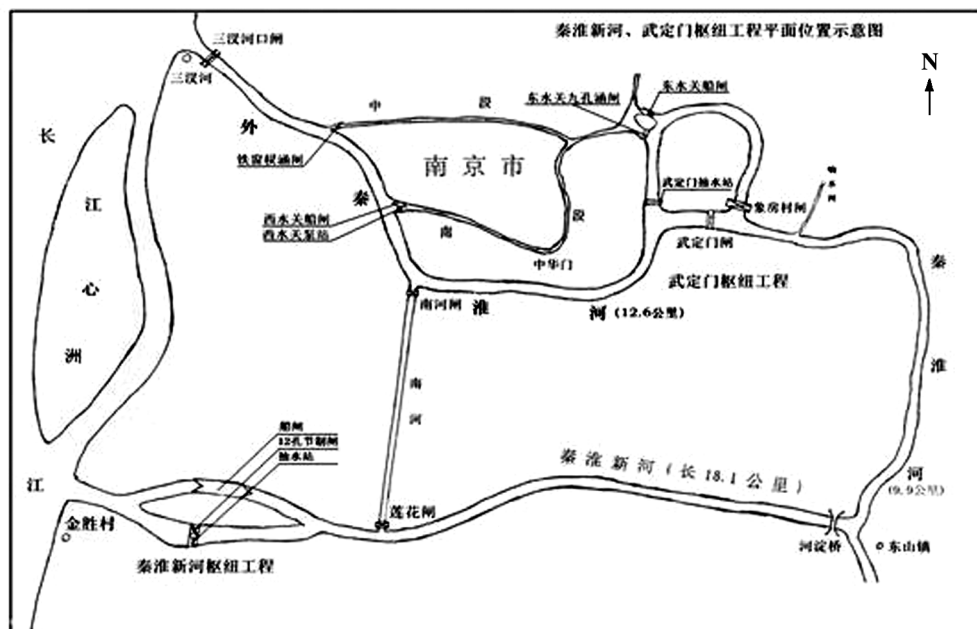


图1 工程流域位置图

向灌排两用泵站,在国内大型水泵中首次采用“S”型双向叶片,水泵叶轮直径 1.70 m,叶轮中心高程 1.0 m,叶片调节机构采用涡轮、蜗杆停机手动调节,叶片角调节范围为 $-6^{\circ} \sim +4^{\circ}$ 。采用平面“S”型流道、快速闸门断流。

2 泵站监测

水利、市政、石化、工矿各行业,凡有流体输送,必作流量计测。依据“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”新时期水利工作方针,其“节水”“均衡”都有水的量化,凡供水工程,均有或应有量水、配水要求,宜作精准流速流量计测,来监测泵站运行效率。

水利行业中,泵站是运用泵机组及过流设施传递和转换能量、实现水体输送的水利工程,是国家重要的国民经济基础设施。我国已建各类泵站近 60 万座,大型泵站 500 余座。泵站数及动力保有量远多于世界其它国家。各类泵站特别是包括南水北调的大型泵站,完善流量及效率监测是考核工程效益,实现科学运行和调度的重要任务或课题。

泵站监测是泵站技术管理的基础工作,国家及相关业务主管部门曾组织制订诸多泵站规程规范,规定监测的必要性、重要性。如:国标《泵站设计规范》(GB 50265-2010),水利部行标《泵站技术管理规程》(GB/T 30948-2014)及《泵站现场测试与安全检测规程》(SL 548-2011)。包括泵站及其它水源工程的监测,还有相关规定和要求,如:①2011 年

中央 1 号文件和同年中央水利工作会议对水源工程有“开发利用控制”“用水效率控制”“严格管理考核”规定;②2014 年国务院《南水北调工程供用水管理条例》除“验收”“管理”的规定外,还有“水量调度、工程监测”规定;③2016 年国务院《农田水利条例》有灌溉用水“总量控制定额管理相结合”“有偿使用计量收费”规定等。

泵站技术管理的核心内容是“八项技术经济指标”。但是,根据各地部分泵站现场测试,现有泵站普遍存在实际流量不足,单机泵站效率及装置效率不高。就泵站效率而言,中大型泵站约 50% ~ 60%,小型泵站 40% ~ 50% 或更低。根据可靠的模型试验结果,即使 3 ~ 5 m 扬程的低扬程泵站,最大装置效率均可达到 80%,两者差距很大。鉴于我国泵站面广量大,提高泵站管理水平和效率,对于减少浪费,贯彻节能减排意义重大。

泵站管理中存在的主要问题是无完善的监测设备,泵站监测中,主要或最重要的指标是流量指标,现有监测往往仅有电功率仪表,扬程标尺或仪表,缺少流量仪表。部分泵站有微机监控系统、中控室,其中流量显示值实际是抄录水泵铭牌的数值而非真实数值。因此,无法准确、定量掌握“能源单耗”“单机泵站效率”“装置效率”,泵站运行只是一种无法核算的“粗放式”作业。

3 泵站流量测试方法

3.1 泵站测流方法简述

泵站测试的重点是流量测试。可用于等径直

管并固定安装的流量计很多,如电磁流量计、涡轮流量计、文吐里流量计、超声波流量计等。我国已建泵站扬程高低不等,其中高扬程泵站有等径直管段,可任选工业流量计,但是我国已建泵站 80% ~ 90% 是扬程 10 m 以下的低扬程泵站,往往无等径直管段,无法安装工业流量计,流量计测是业界长期存在的难题。《泵站现场测试与安全检测规程》提及的泵站流量测定方法有食盐浓度法、进水流道多点流速仪法等。可用的方法还有河道水文测验方法 H-ADCP(走航式声学多普勒流速剖面仪),国内近年新建部分南水北调泵站采用内贴式多普勒超声波流量计,偶见大泵站采用“插入式”探针(皮托球)^[1]及“插入式”电磁流量计,插入部位系泵进口渐缩形锥管(泵吸水室)。

3.2 现有测流方法缺陷

3.2.1 食盐浓度法

食盐浓度法是在泵进口掺如确定流量、确定浓度盐水,在泵出口取样检验含盐水体浓度以确定水泵流量的方法^[2]。此法盐水流量难控制,取样水体含盐浓度难准确定量,具体实施复杂,精度不高。值得指出的是:此法只是标定性方法而不可能作为监测方法。作为标定也仅见 30 年前南水北调东线江都泵站使用,未见推广应用。

3.2.2 ADCP 声学多普勒流速仪

此法系河道测流方法。对于泵站测流而言,是间接测试方法^[3-4],存在一定缺陷。

(1) ADCP 声学多普勒流速仪河道测流须有标准过流断面,对于已建但无标准过流断面的泵站,新做标准过流断面不可行或耗费巨大。

(2) 根据 ADCP 测流原理,即使用于标准过流断面,其流速测量范围有限,水面、河底及两岸存在 4 个“盲区”,盲区内的流速根据经验估算,因此流量测量精度较低。

(3) 应用实例。2005 年甘肃张掖黑河莺落峡水文站完成基金项目,对 5 m 宽矩形河段,通过“测流模式”“测船速度”“航行方向”不同组合数十次实际测试,与流速仪“5 线 3 点法”结果对比,误差普遍在 10% 以上,部分在 20% 以上。超声波河道测流方法对于泵站测流而言,只能起“宏观掌控”作用,非“精确测量”手段。

3.2.3 内贴超声波法测流

(1) 内贴超声波测流的信号发射、接收装置“内贴”(预埋)于水泵进水流道混凝土内,安装复杂,维修、更新困难^[5]。

(2) 超声波测流的应用条件是:具有一定直段长度 $L (\geq 10 D)$, D 为管道直径)的圆形管道。大泵进水流道断面为渐变的矩形,无等截面段,不具备超声波法测流条件。根据流体力学的研究,封闭圆管道内流速分布符合尼古拉兹(Nikuradse)公式所表达的规律:

$$v_x = v_{\max} (1 - r_x/R)^{1/n} \quad (1)$$

式中, v_x 、 v_{\max} 分别为半径 r_x 处及管中心的流速, R 为管半径,指数 n 与雷诺数 Re 有关:

$$n \approx 9.9 - 53.6 / (Re / 10^4) + 118 / (Re / 10^4)^2 \quad (2)$$

(3) 超声波法实际测定量系断面中发射、接收点之间线平均流速,不是断面平均流速,需要合理地修正。信号发射、接收装置“内贴”于水泵进水流道,因其中流动极复杂,任意发射、接收点之间线平均流速与断面平均流速两者并无确定的关系,理论上无法修正。

(4) 实际应用中,生产厂家的做法是:针对特定流道(图纸),运用三维流动数值计算(CFD)结果选定信号发射、接收位置。但这样做的前提是每种不同流道均须作出三维流动计算并认定计算结果准确可信。商用软件(如 Fluent)计算流动特性存在较大的近似性及人为性,以此为据确定流量计安装位置,存在不可估算的误差。

(5) 常规外夹便携式超声波流量计,根据相关规范,要求使用前“按标准 IEC600193 中描述的原级测量方法进行率定,率定用的管路系统条件应与试验时相同”。实际很难做到,内贴式超声波流量计更是无法率定。

(6) 作为泵站监测仪器的超声波流量计,根据相关规范,还应满足“周期检定”要求^[6]。内贴式超声波流量计安装复杂,维修、更新困难,而特别是以三维流动数值计算结果为根据的工作机理,采用超声波流量计既无法检定,更无法“周期检定”,此法实用意义不大。根据南水北调东线一期验收技术检查,内贴式超声波流量计未见有成功用例。

3.2.4 插入式探针及插入式电磁流量计

插入式探针使用操作复杂。作为泵站流量测量,只能作标定,不可能作监测。再者,因测点难掌控,流速系数难标定,精度不高。

插入式电磁流量计实际测定量也是点流速。插入管中一定深度,以特定位置点流速代替断面平均流速。此法仅适用标准圆形管道,精度不高。需要指出的是:低扬程泵大多为轴流泵,进口锥形管

内有导水锥,过流断面为环形而非圆形,无从得知任何位置点的流速与断面平均流速的数理关系,实际并不适用,也未见成功的示例。

4 绕流管流速流量计适用性

绕流管流速流量计是近年研制和出现的新型流速流量计。绕流管流量计用于泵站测流具有突出优点,在南水北调及安徽引江济淮等多处泵站应用^[7-9]。绕流管流量计可作为标定性设备,更适于作泵站永久监测设备。绕流管流量计是低扬程泵站测流最佳或唯一选择,建议推广应用。以下介绍绕流管流量计原理、安装及使用。

4.1 流速流量计工作原理

绕流管流量计是根据绕流圆柱压力分布特性研制的差压式流量计^[10],并为国家发明专利^[11]。图2为绕流管工作原理图。图中 v 为测点流速, θ 为偏角, p_0 为正压点0的压力, p 为偏置点1及2的压力。图3为绕流管流速系数图。

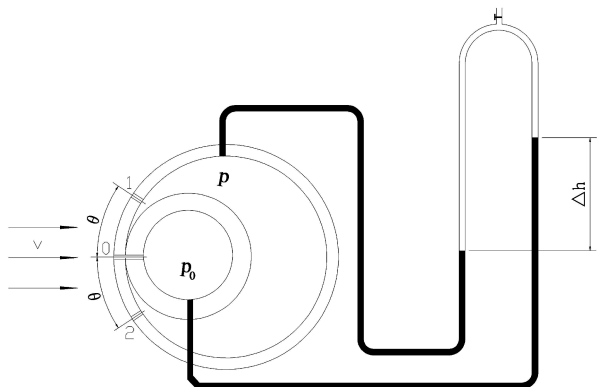


图2 绕流管测流原理图

绕流管测流理论关系可写成:

$$p_i + m_i \rho v^2 = p_0 \quad (3)$$

$$v = K [\Delta p / (m_i \rho)]^{1/2} \quad (4)$$

式中, p_i 为任意偏角位置处压力, m_i 为对应于 p_i 的动压系数, Δp 为正压点0与偏置点1及2的动压差,其余符号意义同前。

对照图2,绕流管流速系数 K 随雷诺数 Re 大小有不同的变化,但偏角 θ 一定范围内则与雷诺数 Re 无关,有对应确定值,这是绕流管独特的优点。因受加工设备、加工技术影响,实际使用时,流速系数须经标定。绕流管法因流速系数恒定,可多点测流,根据相关规范如国际标准ISO3966计算流量。

4.2 流速流量计应用

以下图4、图5、图6分别为绕流管流量计、管道流量计、指示仪表。图7、图8为大泵用绕流管及绕

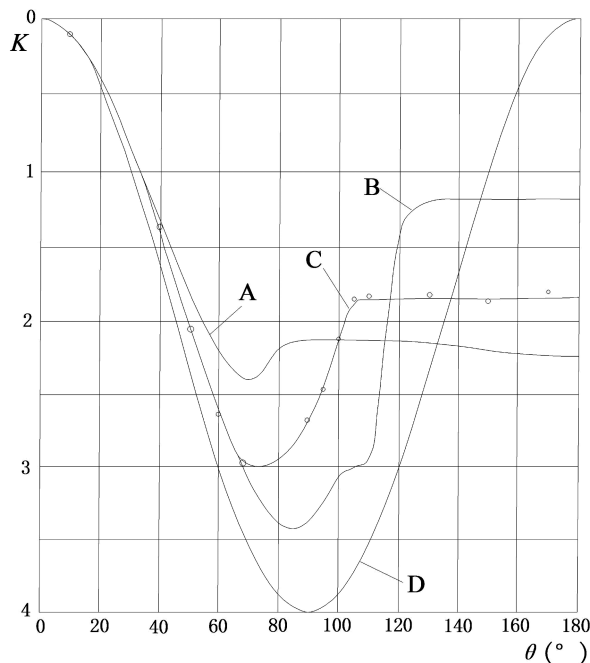


图3 绕流管流速系数图

流管流量计。管端带截止阀,维修插入及拔出管道无须排水。



图4 绕流管流量计



图5 管道流量计

4.3 绕流管流量计安装

绕流管插入管道多点测流,安装位置在泵进口吸水室。机械行业标准《Q/CKD001-2004》4.1.8



图6 指示仪表



图7 带截止阀绕流管



图8 带截止阀大泵绕流管流量计

规定:“锥角不大于 15° 的渐缩管可视为直管”,这是在泵吸水室取测流断面测定泵流量的规范根据。图9、图10分别为南水北调宝应泵站(混流泵)、安徽驷马山乌江泵站(轴流泵)绕流管安装位置。

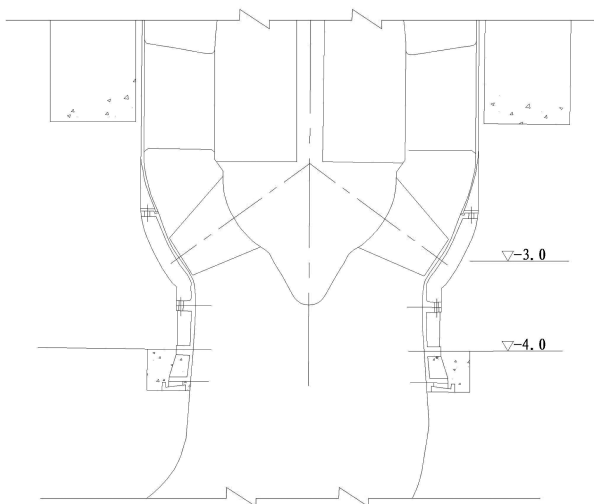


图9 D=2.95 m 混流泵绕流管安装位置

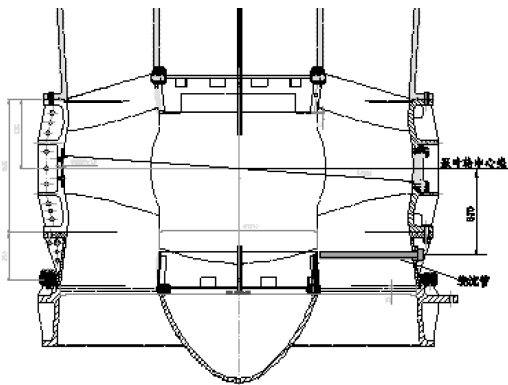


图10 D=2.8 m 轴流泵绕流管安装位置

4.4 绕流管法泵站流道测流及安装

秦淮新河泵站属于低扬程泵站,泵装置无等径直管段,无法安装任何一种工业流量计。本次试验,参照国际标准 ISO 3354 - 75 和 ISO/TC30 - 3966 - 77,运用特制绕流管实现。《绕流管流速流量计》是国家发明专利(ZL 200710153981.3),其配备传感器——带排气孔的T型压差传感器是实用新型专利(ZL201420722073.7)。图11为秦淮新河泵站总装图,图12为绕流管安装尺寸图。

4.5 测试结果分析

4.5.1 效率指标

现场测试时,实际扬程 $H_{sy} = 0.9$ m,电机输入功率 $P = 350$ kW,因水泵运行远离设计工况点,单机泵站效率低: $\eta_{st} < 20\%$ 。

4.5.2 流量数值

5#机运行从长江侧提水,水泵叶片角 $+2^\circ$ 。对照正向运行装置特性曲线,流量 $Q \approx 11.8$ m³/s。绕流管流速流量计实测流量 $Q \approx 11.5$ m³/s,两者吻合,说明泵站装置模型试验结果准确可信。

4.5.3 数值分析

(1) 关于轮毂尺寸影响

绕流管安装位置处设计计算过流面积 $S = 2.011$ m²,因轮毂尺寸稍大于图纸标注尺寸,实际过流面积 $S = 2.002$ m²,现场所测流量较实际流量可能高出0.4%左右。

(2) 关于前导叶影响

1700ZWSQ 水泵有前导叶(5片,厚度3 cm),为避开导叶影响,绕流管安装位置选在2个叶片之间。但是,绕流管距导叶较近(15 cm),仍难免有一定影响,比如实测流速可能稍偏大。顺水流方向导叶投影面积0.084 m²,以绕流管直接置于2个叶片之间的极端情况看待,实际过流面积要减小4%。因导叶叶片影响,本次现场测定的流量可能稍大于

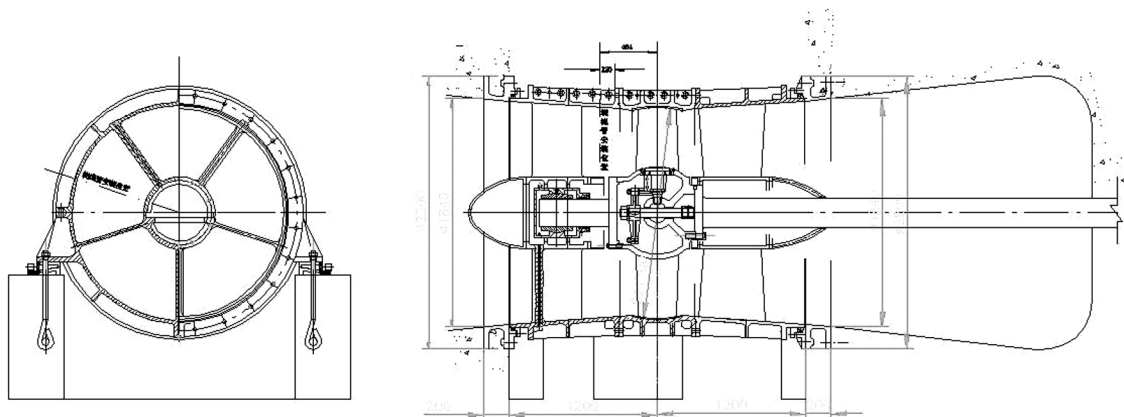


图 11 1700ZWSQ 水泵装配示意图

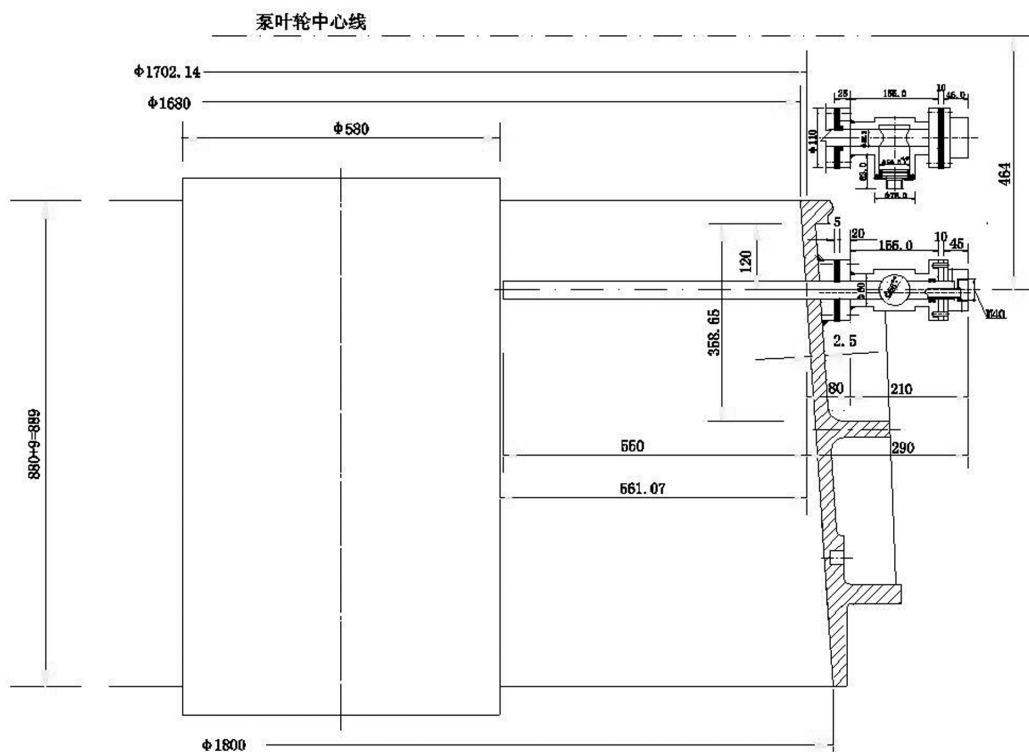


图 12 绕流管安装尺寸图

实际流量,极端情况可能增大 2% 左右。

4.5.4 流量测试误差估算

封闭管道测流有相关规范,如 ISO 3354 - 75、ISO/TC30 - 3966 - 77 等。但是,秦淮新河泵站泵吸水锥管绕流管位置点处过流断面为环形,流速分布复杂,影响测量精度除仪表精度外,主要因素应是测点数,本次采用多点测量可提高精度。

本次测试沿半径方向取 8 个测点。近似取测点数有限所造成的流速误差 $\delta_{v1} = \pm 1\%$; 流速系数经南京航空航天大学标定,取标定误差 $\delta_{v2} = \pm 0.5\%$; 过流断面对照图纸现场测量、核对,取管内径及叶轮导水锥直径尺寸制作和量测误差为 5 mm,则最大面积误差 δ_s 不大于 $\pm 0.5\%$,传感器误

差 $\pm 0.2\%$,指示仪误差 $\pm 0.2\%$,读数(随机)误差 $\delta_n = \pm 0.5\%$ 。则流量测定总误差约为:

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_{v1}^2 + \delta_{v2}^2 + \delta_s^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_n^2} = \sqrt{2 \times 1^2 + 3 \times 0.5^2 + 2 \times 0.2^2} \% = \pm 1.68\%$$

水利部行业标准《泵站现场测试与安全监测规程》(SL 548 - 2012) 规定流量不确定度不大于 $\pm 3.5\%$,本次测试流量精度高于规范要求。

4.5.5 现场测试结果

试验所采用的绕流管流速流量计有创新,精度高于《泵站现场测试与安全检测规程》(SL/T548 - 2012) 规定的 $\pm 3.5\%$; 现场试验采用绕流管为不锈

(下转第 40 页)

(上接第 36 页)

钢件,插入水泵进口吸水室部位,测试方案可行,能满足泵站现场监测要求,可实际应用于泵站工程运行。

5 结语

泵站监测中的流量监测是提高泵站管理水平,考核工程效益的重要工作。我国泵站面广量大,但是管理水平不高,其重要方面即缺乏完善的监测手段。就技术层面而言,其中流量监测也是长期尚待解决的难题。近年研制出现的绕流管测流方法具有突出优点,推荐采用、推广绕流管法作泵站测流。本文以江苏省秦淮新河泵站为例,论述了泵站绕流管法流量测量的应用,希望我国各类泵站,包括南水北调东线、中线源头及北京段的泵站,通过流量监测推动全面监测,并逐步实现远程监控、物联网监控。

绕流管法测流应用尚少,生产、安装、维护经验不多,在今后的推广应用中还需不断改进,不断完善。

参考文献:

[1] 仇宝云,刘超,等. 探针测定大型水泵流量研究[J].

农业机械学报, 2004(4).

[2] 沈日迈. 江都排灌站[M]. 水利电力出版社, 1986: 389-417.

[3] 郑源,赵宗引,等. 低扬程大流量泵站单机流量试定[J]. 南水北调与水利科技, 2006(5).

[4] 陈学林. 声学多谱勒流速剖面仪流量测验精度分析[J]. 人民黄河, 2005, 27(7):12-14.

[5] 周济人,杨华,等. 低扬程水泵超声波流量计流量测试[J]. 排灌机械, 2009, 27(1).

[6] 苗豫生. 论大口径流量计的在线检定[J]. 环境技术网, 2007(7).

[7] 李彦军,严登丰. 一种新型差压流速流量计的研制与应用[J]. 排灌机械, 2009, 27(4):251-254.

[8] 严登丰,刘军,李彦军. 刘山泵站现场测试方法与应用分析[C]. 2009 全国大型泵站更新改造研讨暨新技术、新产品交流大会论文集. 2009.

[9] 许实付,夏长虹. 驷马山乌江泵站绕流管法流量监测技术研究与应用[J]. 江淮水利科技, 2016(2).

[10] 严登丰. 泵站工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005:299-332.

[11] 严登丰. 绕流管流速流量计:中国, CN200710153981. 3[P]. 2009-03-25.